

# 新型 3 自由度可约移动并联机构的构型及设计\*

张 勇

(燕山大学机械工程学院 秦皇岛 066004)

高 峰

(上海交通大学振动、冲击、噪声国家重点实验室 上海 200030)

摘要：提出了一般可约系统的定义。从研究运动不耦合的 3 自由度移动并联机构的输入输出关系出发，给出了 3 自由度可约移动并联机构的定义和判定充要条件。定义了一种新的  $G_T$  坐标，利用此坐标给出了可约并联机构的型综合一般过程，并综合出了 5 种 3 自由度可约移动并联机构。针对这类机构的特殊性能，以其中一种机构为例，基于机构动平台参考点的工作空间进行了优化设计。

关键词：可约机构 型综合  $G_T$  坐标 优化设计

中图分类号：TP24

## 0 前言

在并联机构中，有一类特殊的机构正在以其在运动控制、轨迹规划、高速、高精度等方面的优势引起越来越多的注意。这类机构在整个工作空间或者某些点上运动不耦合。Gosselin<sup>[1]</sup>提出了一种可以独立运动的 2 自由度空间转动并联机构。Han 和 Tsai<sup>[2]</sup>提出了一种 3 自由度移动并联机构，每个支链提供一个独立的移动自由度。某些只在工作空间的特殊点上具有不耦合运动的并联机构可以用作微动机构<sup>[3,4]</sup>。然而，针对这类机构的理论研究，无论是机构的定义还是构型方法都是十分匮乏的。究其原因主要包括两个方面。其一，没有这种机构的准确且被普遍接受的定义。其二，在给定机构的自由度数目和性质的条件下构造并联机构是十分困难的。如果再加上机构运动不耦合的条件，难度就更大。虽然很多学者在并联机构构型方面进行了深入的研究，发展了诸如基于自由度计算公式的列举法<sup>[5]</sup>、基于李群理论的综合方法<sup>[6]</sup>、基于螺旋理论的综合方法<sup>[7]</sup>、基于约束的综合方法<sup>[8]</sup>等多种并联机构型综合理论，但是关于这类特殊机构的型综合方法仍然十分缺乏。

以这种运动不耦合的 3 自由度移动并联机构为研究对象，从讨论机构的输入输出的关系入手，将此种机构定义为可约机构。提出了基于  $G_T$  坐标的

型综合方法，并综合出了五种机构。针对这类机构的特殊性能，以其中的一个机构为例，基于动平台的工作空间对机构进行了优化设计。

## 1 3 自由度可约移动机构的定义

### 1.1 可约系统的定义

一般的，设系统的输入为  $S = (s_1, s_2, \dots, s_m, L, s_m)$ ，输出为  $Q = (q_1, q_2, \dots, q_n, L, q_n)$ ， $m \geq n$ 。如果存在某种分组方法和数  $k (2 < k \leq n)$  使得以下条件可以得到满足，则系统被称为可约机构。

条件 1 所有  $S$  和  $Q$  中的元素可以分成  $k$  组

$$S = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ \vdots \\ M \\ s_m \end{bmatrix} \Rightarrow S = \begin{bmatrix} S'_1(s_1, s_1, L) \\ S'_2(s_3, s_j, L) \\ \vdots \\ M \\ S'_k(s_2, L) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ \vdots \\ M \\ q_n \end{bmatrix} \Rightarrow Q = \begin{bmatrix} Q'_1(q_3, q_i, L) \\ Q'_2(q_2, q_j, L) \\ \vdots \\ M \\ Q'_k(q_1, L) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中  $i < k$   $j < k$

条件 2  $S$  和  $Q$  中的每个元素只能在一个组  $S'_l$  ( $1 \leq l \leq k$ ) 或  $Q'_r$  ( $1 \leq r \leq k$ ) 中存在。

条件 3 分组后的元素  $S'_l$  ( $l < k$ ) 只能和一个  $Q'_r$  ( $r < k$ ) 有关，反之亦然。

### 1.2 3 自由度可约移动机构的定义

对于 3 自由度移动并联机构来说，系统输入速度或角速度，输出动平台的速度。在这个系统中，

\* 国家杰出青年基金(50125516)、振动、冲击、噪声国家重点实验室(VSN-2005-07)和天津市自然科学基金重点(043801811)资助项目。20041230 收到初稿，20050425 收到修改稿

$m = n = 3$  ,  $k$  可以取值 2 或 3。这里只讨论  $k = 3$  的情况。如果分组方法存在的话, 每组中只有一个元素。

对于 3 自由度移动并联机构

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}\dot{\mathbf{q}} \quad (3)$$

式中  $\mathbf{J}$  —— Jacobian 矩阵

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$\dot{\mathbf{q}}$  —— 广义输入速度

$$\dot{\mathbf{q}} = [\dot{q}_1 \ \dot{q}_2 \ \dot{q}_3]^T \quad (5)$$

$\dot{\mathbf{x}}$  —— 输出速度

$$\dot{\mathbf{x}} = [\dot{x}_1 \ \dot{x}_2 \ \dot{x}_3]^T \quad (6)$$

可约机构的本质是输入和输出之间的一一映射。每个输入的  $\dot{q}_i$  和唯一的一个  $\dot{x}_j$  对应, 反之亦然。假设映射关系为

$$\begin{cases} \dot{q}_1 \rightarrow \dot{x}_1 \\ \dot{q}_2 \rightarrow \dot{x}_2 \\ \dot{q}_3 \rightarrow \dot{x}_3 \end{cases} \quad (7)$$

则有

$$\begin{cases} J_{31} \neq 0 \\ J_{32}\dot{q}_2 + J_{33}\dot{q}_3 = a \\ J_{23} \neq 0 \\ J_{21}\dot{q}_1 + J_{22}\dot{q}_2 = b \\ J_{12} \neq 0 \\ J_{11}\dot{q}_1 + J_{13}\dot{q}_3 = c \end{cases} \quad (8)$$

式中  $a, b$  和  $c$  是常数。

式(8)的解为

$$[J_{11} \ J_{13} \ J_{21} \ J_{22} \ J_{32} \ J_{33}]^T = \mathbf{0} \quad (9)$$

可以得到

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & J_{12} & 0 \\ 0 & 0 & J_{23} \\ J_{31} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

无论式(7)中的映射关系发生怎样的变化, 式(10)中的 Jacobian 矩阵都具有以下的两个特点。

- (1) 矩阵每列只有一个非零元素。
- (2) Jacobian 矩阵和转置的乘积是对角阵。

$$\mathbf{J}\mathbf{J}^T = \mathbf{B} = \text{diag}(b_{11} \ b_{22} \ \dots \ b_{ii}) \quad (11)$$

从矩阵的性质可以证明这两个特点是判断机构是否可约的充要条件。定义当一个 3 自由度移动并联机构的 Jacobian 矩阵满足特点(1)和特点(2)的

时候, 机构为绝对可约机构。在这个定义中, Jacobian 矩阵反映了 3 自由度并联机构输入和输出之间的一一映射关系。映射即为可约的本质。

## 2 并联可约机构的型综合

### 2.1 $G_f$ 坐标

提出一种新的  $G_f$  坐标表示运动副、支链和机构的运动特性。

$$\mathbf{G}_f = (v_x \ v_y \ v_z; w_a \ w_b \ w_g) \quad (12)$$

式中  $v_x, v_y, v_z$  —— 末端执行器的速度

$w_a, w_b, w_g$  —— 对应于欧拉角的末端执行器的相对角速度(图 1)

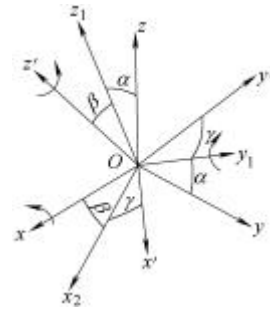


图 1 欧拉角

将  $G_f$  坐标中的元素简化。非零元素, 也就是表示存在角速度或速度的元素, 用 1 表示。零元素, 即表示不存在角速度或速度的元素, 用 0 表示。这样  $G_f$  坐标可以得到简化。

由串连支链组成的并联机构的  $G_f$  坐标值可以通过式(13)计算出来

$$\mathbf{G}_f = \mathbf{G}_{f1} \mathbf{I} \ \mathbf{G}_{f2} \mathbf{I} \ \mathbf{G}_{f3} \quad (13)$$

式中,  $G_{fi}$  是第  $i$  个支链的  $G_f$  坐标值。式(13)的计算符合逻辑运算法则。图 2~6 分别是几种串连运动链的  $G_f$  坐标值。

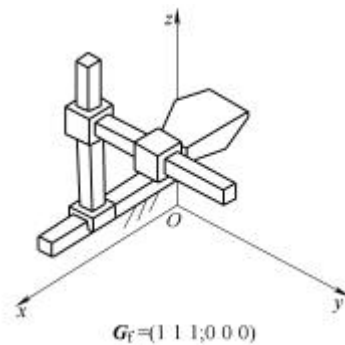
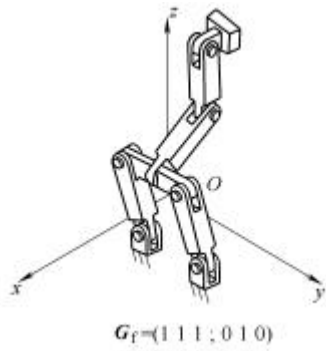
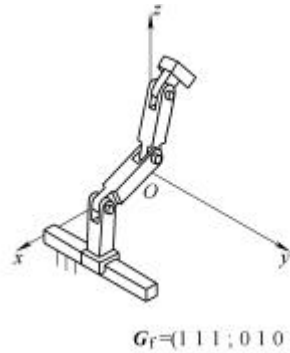
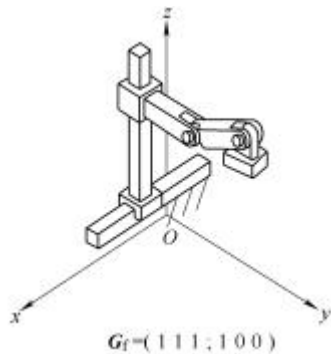
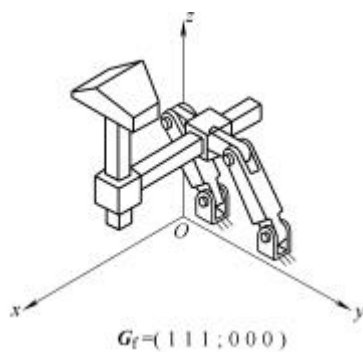


图 2 PPP 运动链及其  $G_f$  坐标值

图 3 4RRRR 运动链及其  $G_f$  坐标值图 4 PRRR 运动链及其  $G_f$  坐标值图 5 PPRR 运动链及其  $G_f$  坐标值图 6 4RPP 运动链及其  $G_f$  坐标值

## 2.2 3 自由度可约移动并联机构的构型设计

进行 3 自由度可约移动机构的型综合, 首先设定机构处于可约位型上, 即机构的三个支链呈正交分布。给定要设计的并联机构的  $G_f$  坐标值, 很容易得到支链的  $G_f$  坐标值, 由支链可以构造出并联机构。最后, 计算其 Jacobian 矩阵, 用充分必要条件来检验机构是否可约。这就是 3 自由度可约移动并

联机构的型综合过程, 如图 7 所示。

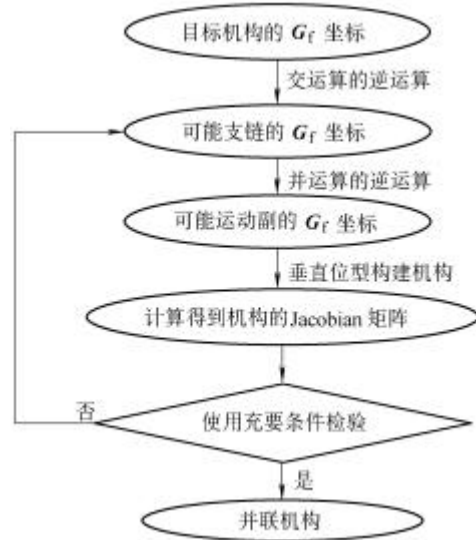


图 7 型综合过程

目标机构的  $G_f$  坐标值为

$$G_f = (1 \ 1 \ 1; 0 \ 0 \ 0) \quad (14)$$

可能的支链  $G_f$  坐标值为

$$\begin{cases} G_{f1} = (1 \ 1 \ 1; 0 \ 0 \ 0) \\ G_{f2} = (1 \ 1 \ 1; 1 \ 0 \ 0) \\ G_{f3} = (1 \ 1 \ 1; 1 \ 1 \ 0) \end{cases} \quad (15)$$

由这些支链的  $G_f$  坐标值可以找到对应的串联支链, 按照图 7 所示的型综合过程, 得到 3 自由度可约移动并联机构。图 8 所示的 3-PPP 和图 9 所示的 3-PRRR 为其中的两种。其中, 3-PRRR 机构已经由 Han<sup>[2]</sup>提出。

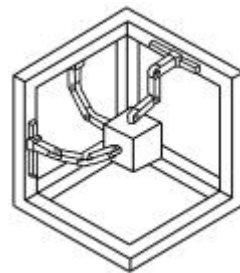


图 8 3-PPP 可约机构

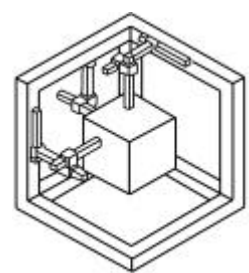


图 9 3-PRRR 可约机构

## 3 基于工作空间的优化设计方法

### 3.1 3-PRRR 机构的几何特性

3-PRRR 机构如图 10 所示。动定平台之间由呈正交分布的三条 PRRR 支链相连。建立定坐标系如图 10 所示。 $x$  轴通过移动副  $A_1$  的轴线,  $A_2$  平行于  $y$  轴, 到  $y$  轴的距离为  $d_{2z}$ ,  $A_3$  平行于  $z$  轴, 到  $x$  和  $y$  轴的距离分别是  $d_{3y}$  和  $d_{3x}$ 。这样, 分支 1 中各转动副轴线均平行于  $x$  轴, 分支 2 中转动副轴线均平行

于  $y$  轴，分支 3 中转动副轴线均平行于  $z$  轴。动坐标系的原点位于动平台的中心，坐标轴分别平行于固定坐标系的轴线且方向相同。各支链中杆件的长度和角度都已标注在图 10 中。

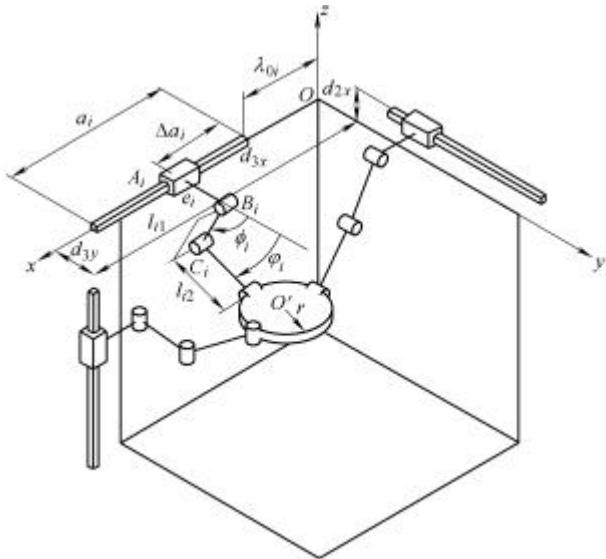


图 10 3-PRRR 并联机构的参数

在 3-PRRR 机构中，三个运动支链分别约束住动平台的转动自由度，所以机构为 3 自由度移动机构，角度  $y_i$  总是零。由三条支链计算出的动坐标系原点坐标分量分别为

$$\begin{cases} x_{O'} = I_{01} + \Delta a_1 = \\ e_2 + l_{21} \cos f_2 + l_{22} \cos j_2 + r = \\ d_{3x} - e_3 - l_{31} \cos f_3 - l_{32} \cos j_3 - r = \\ y_{O'} = e_1 + l_{11} \cos f_1 + l_{12} \cos j_1 + r = \\ I_{02} + \Delta a_2 = \\ d_{3y} + l_{31} \sin j_3 + l_{32} \sin j_3 \\ z_{O'} = -l_{11} \sin f_1 - l_{12} \sin j_1 = \\ d_{2z} - l_{21} \sin f_2 - l_{22} \cos j_2 = \\ -I_{03} - \Delta a_3 \end{cases} \quad (16)$$

动坐标系原点的坐标可用含有驱动副变量的参数表示为

$$O'(I_{01} + \Delta a_1, I_{02} + \Delta a_2, -I_{03} - \Delta a_3) \quad (17)$$

可以得到机构的 Jacobian 矩阵

$$J = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

分析 3-PRRR 机构的 Jacobian 矩阵，可以看出 3-PPP 机构是可约移动并联机构。

### 3.2 3-PRRR 的优化设计

基于并联机构动平台的工作空间进行优化设计。优化目标如下。

(1) 工作空间和机构占用空间的体积比最大

$$h = \frac{W}{V} \quad (19)$$

式中  $W$ ——机构动平台参考点的工作空间体积  
对于 3-PRRR 机构来说

$$W = a_1 a_2 a_3$$

式中  $a_i$ ——支链  $i$  中驱动移动副的行程

(2) 所有的杆长最小。约束条件除了包括可约机构本身的结构特点外还包括机构的驱动副可以在全范围内运动。

3-PRRR 机构中有 21 个待定参数，其中  $r$  和  $e_i$  取决于实际的零件尺寸和安装尺寸，所以可在理论上设其值为零。式(16)可写为

$$\begin{cases} x_{O'} = I_{01} + \Delta a_1 = \\ l_{21} \cos f_2 + l_{22} \cos j_2 = \\ d_{3x} - l_{31} \cos f_3 - l_{32} \cos j_3 \\ y_{O'} = l_{11} \cos f_1 + l_{12} \cos j_1 = \\ I_{02} + \Delta a_2 = \\ d_{3y} + l_{31} \sin j_3 + l_{32} \sin j_3 \\ z_{O'} = -l_{11} \sin f_1 - l_{12} \sin j_1 = \\ d_{2z} - l_{21} \sin f_2 - l_{22} \cos j_2 = \\ -I_{03} - \Delta a_3 \end{cases} \quad (20)$$

为满足驱动副在全范围内运动的约束条件，有

$$\begin{cases} d_{3y} \leq I_{02} \\ I_{01} + a_1 \leq d_{3x} \end{cases} \quad (21)$$

机构所占用的体积为

$$V = (x_{\max} + |x_{\min}|)(y_{\max} + |y_{\min}|)(z_{\max} + |z_{\min}|) \quad (22)$$

式中

$$\begin{aligned} x_{\max} &= I_{01} + a_1 + l_{31} \\ y_{\max} &= I_{02} + a_2 + l_{11} \\ |z_{\min}| &= I_{03} + a_3 \\ z_{\max} &= d_{2z} + l_{21} \\ x_{\min} &= y_{\min} = 0 \end{aligned}$$

则 3-PRRR 机构的工作空间比为

$$h = \frac{a_1 a_2 a_3}{(I_{01} + a_1 + l_{31})(I_{02} + a_2 + l_{11})(I_{03} + a_3 + d_{2z} + l_{21})} \quad (23)$$

式(23)即为优化函数，优化的目标为使得比值  $h$  最大。令

$$\begin{cases} I_{01} = x_1 a_1 \\ I_{02} = y_1 a_2 \\ I_{03} = z_1 a_3 \\ d_{2z} = z_d a_3 \end{cases} \quad (24)$$

式中  $x_1 \geq 1, y_1 \geq 1, z_1 \geq 1, z_d \geq 0$ 。

式(23)可改写为

$$\mathbf{h} = \frac{1}{\left(x_i + 1 + \frac{l_{31}}{a_1}\right) \left(y_i + 1 + \frac{l_{11}}{a_2}\right) \left(z_i + 1 + z_d + \frac{l_{21}}{a_3}\right)} \quad (25)$$

当分母中的参数均取最小值  $x_i = 1$ ,  $y_i = 1$ ,  $z_i = 1$ ,  $z_d = 0$  时,  $\mathbf{h}$  有可能取值最大。可得到

$$\begin{cases} l_{0i} = a_i & i=1,2,3 \\ d_{2z} = a_3 \end{cases} \quad (26)$$

对于 RRR 串联机构来说, 对于相同的  $l_{i2} + l_{i3}$  ( $i=1,2,3$ ) 值, 当  $l_{i2} = l_{i3}$  时机构具有最大的工作空间, 所以这里设定

$$\begin{cases} l_{12} = l_{13} = l_1 \\ l_{22} = l_{23} = l_2 \\ l_{32} = l_{33} = l_3 \end{cases} \quad (27)$$

当机构动平台参考点位于工作空间的边界时, 机构奇异。为了使机构中杆件的尺寸最小, 不妨设定此时机构的从动副也处于奇异位型。对于上面讨论的所有移动副位于行程终点的情况, 即  $\Delta a_i = a_i$ , 机构处于工作空间顶点位置, 可以设定此时  $\mathbf{f}_1 = \mathbf{j}_1$ ,  $\mathbf{f}_2 = \mathbf{j}_2$ , 但  $\mathbf{f}_3 \neq \mathbf{j}_3$ 。式(20)可改写为

$$\begin{cases} a_1 = l_2 \cos \mathbf{f}_2 = d_{3x} - l_{31} \cos \mathbf{f}_3 - l_{32} \cos \mathbf{j}_3 \\ l_1 \cos \mathbf{f}_1 = a_2 = d_{3y} + l_{31} \sin \mathbf{f}_3 + l_{32} \sin \mathbf{j}_3 \\ l_1 \sin \mathbf{f}_1 = l_2 \cos \mathbf{f}_2 = a_3 \end{cases} \quad (28)$$

可以解得

$$\begin{cases} l_1 = \sqrt{a_2^2 + a_3^2} \\ l_2 = \sqrt{a_1^2 + a_2^2} \end{cases} \quad (29)$$

当  $\Delta a_1 = 0$ ,  $\Delta a_2 = a_2$ ,  $\Delta a_3 = a_3$  时, 式(20)写为

$$\begin{cases} d_{3x} - l_{31} \cos \mathbf{f}_3 - l_{32} \cos \mathbf{j}_3 = 0 \\ a_2 - d_{3y} = l_{31} \sin \mathbf{f}_3 + l_{32} \sin \mathbf{j}_3 \end{cases} \quad (30)$$

解得

$$l_3 = \sqrt{(a_2 - d_{3y})^2 + d_{3x}^2} \quad (31)$$

为使杆长  $l_3$  最小, 参考式(21)可以得到

$$\begin{cases} d_{3x} = a_1 \\ d_{3y} = 0 \\ l_3 = \sqrt{a_1^2 + a_2^2} \end{cases} \quad (32)$$

由此 3-PRRR 机构中所有参数之间的关系为

$$\begin{cases} l_{0i} = d_{2z} = d_{3y} = 0 \\ d_{3x} = a_1 \\ l_1 = \sqrt{a_2^2 + a_3^2} \\ l_2 = \sqrt{a_1^2 + a_2^2} \\ l_3 = \sqrt{a_1^2 + a_2^2} \\ i = 1, 2, 3 \end{cases} \quad (33)$$

## 4 结 论

可约的本质即为输入和输出之间的一一映射关系。当 3 自由度移动并联机构的 Jacobian 矩阵满足每列中只有一个非零元素、矩阵与其转置的乘积是对角阵这两个条件时, 机构完全可约。使用这种  $G_T$  坐标, 提出了 3 自由度移动并联机构的型综合方法。在基于工作空间的优化设计中, 以工作空间比作为优化函数, 以该比值最大化和机构杆长最小化为优化目标, 机构本身的结构函数为约束条件, 在保证机构所有驱动副能够在最大范围内移动的条件下进行优化, 得到了机构中各杆件的长度关系。

## 参 考 文 献

- Gosselin C M. Two degree-of-freedom spherical orienting device. United States patent No.5966991, 1999
- Han S K, Tsai L W. Design optimization of a cartesian parallel manipulator, In: ASME Journal of Mechanical Design, 2003, 125(3): 43 ~ 51
- 高峰, 金振林, 刘辛军, 等. 解耦结构 6 自由度度并联微动机器人. 专利号: ZL99121020.4, 1999
- Gao F, Zhang J J, Chen Y L, et al. Development of a new type of 6-DOF parallel micro-manipulator and its control system. In: IEEE International Conference on Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing, Changsha, 2003, 715 ~ 720
- Tsai L W. The enumeration of a class of three-dof parallel manipulators. In: The Tenth World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms, Finland, 1999, 1 123 ~ 11 266
- Hervé J M. The Lie group of rigid body displacements, a fundamental tool for mechanism design. Mechanism and Machine Theory, 1999, 34: 719 ~ 730
- 黄真, 孔令富, 方跃法. 并联机器人机构学理论及控制. 北京: 机械工业出版社, 1997
- 李秦川. 对称少自由度并联机器人型综合理论及新机构综合: [博士学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2003

## TYPE SYNTHESIS AND DESIGN OF A NOVEL 3-DOF REDUCIBLE TRANSLATIONAL PARALLEL MANIPULATOR

Zhang Yong

(College of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004)

Gao Feng

( State Key Laboratory of Vibration, Shock & Noise,  
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

**Abstract :** The definition of general reducible system is proposed. The relationship between the inputs and outputs of the 3-DOF translational parallel manipulator with independent motions is investigated. The definition of the 3-DOF reducible translational parallel mechanism is presented. Further more, the satisfying and necessary conditions for the judgment of this

kind of mechanisms is given. A new  $G_f$  coordinates is defined for the type synthesis of the reducible parallel mechanisms. And five such mechanisms are presented. Taking one of them as example, a new optimization design method based on the workspace of the moving platform is also presented.

**Key words :** Reducible mechanisms Type synthesis  
 $G_f$  coordinates Optimization design

作者简介：张勇，女，1976 年出生，博士研究生。主要研究方向为并联机器人理论。

E-mail : gracebolar@yahoo.com.cn

## 机械工程学报被 EI 收录论文目次 (2004 年第 12 月)

- 基于小波分析的快速成形过程数学模型.....吴任东 颜永年 卢伟等 (1)
- 感应电动机间接磁场定向控制系统振荡的功率谱分析.....陆益民 毛宗源 张波 (5)
- 摩擦学系统的混沌特性.....朱华 葛世荣 (10)
- 波数域滤波迭代近场声全息.....李卫兵 陈剑 毕传兴等 (14)
- 用 AOM 研究强非线性齿轮系统动力学问题.....张锁怀 沈允文 董海军等 (20)
- 含有 C-C 二副杆的空间机构自适应运动综合方法.....王德伦 王淑芬 (25)
- 基于人工材料密度的新型拓扑优化理论和算法研究.....左孔天 陈立平 钟毅芳等 (31)
- 蛇形机器人行波运动的研究.....陈丽 王越超 马书根等 (38)
- 轮式足球机器人动态性能研究.....赵臣 程福 韩晓军等 (44)
- Stewart 平台机构标定的鸡尾酒法.....刘文涛 唐德威 王知行 (48)
- 杯拉深承载极限研究.....熊志卿 (53)
- AIN/VN 纳米多层膜的共格生长与超硬效应.....李戈扬 劳技军 田家万等 (56)
- 薄壁锥形件拉深成形条件研究.....任运来 聂绍珉 李硕本 (60)
- 改进的生物生长法及其在离心叶轮三维形状优化设计中的应用.....张明辉 黄田 王尚锦 (65)
- 求解任意梁的普遍化方法.....陈连 (71)
- 面向虚拟装配与遥操作的新型数据臂设计.....孟 恩 林华 王田苗等 (75)
- 基于压电驱动器的微动平台开环精密定位控制研究.....魏燕定 吕永桂 陈子辰 (81)
- 碳钢奥氏体不锈钢材料在水电工程中应用的局限性.....鲍崇高 邢建东 高义民等 (86)
- 蜂窝夹芯胞元壳的屈曲特性研究.....梁森 陈花玲 梁天锡 (90)
- 结构光三维测量中的亚像素级特征提取与边缘检测.....梁治国 徐科 徐金梧等 (96)
- 非线性方程组解集边界求解方法及其在并联机构分析中的应用.....叶佩青 李铁民 郑浩峻 (100)
- 高分辨率差线栅位移传感器研究.....彭东林 谭为民 刘小康等 (105)
- 滚滑复合被动关节的研究与开发.....黄玉美 程祥 高峰等 (110)
- 气体静压多孔质球面轴承静态性能分析.....卢泽生 杜金名 孙雅洲 (115)
- 微热光电系统燃烧的若干影响因素的试验研究.....潘剑锋 李德桃 邓军等 (120)
- 纳米晶粒精密电铸层力学性能的试验研究.....雷卫宁 朱荻 曲宁松 (124)
- 基于自运动控制的冗余度机器人运动学优化.....叶平 孙汉旭 张秋豪 (128)
- 现代产品几何量技术规范(GPS)国际标准体系.....蒋向前 (133)
- 红外热像技术在线评估高温炉管剩余寿命.....李明 林翠 李晓刚等 (139)
- 碳纤维复合材料钻孔出口椭圆形分层缺陷的研究.....张厚江 陈五一 陈鼎昌 (145)
- 含雕塑曲面和岛的模具型腔粗加工刀具组合优化方法.....王玉 徐和国 高崇辉等 (150)
- 汽车模具复杂棱脊和沟槽的数字化及激光加工轨迹规划.....刘荷辉 虞钢 (155)
- 用自校正模糊滑动控制器解决数控系统中的非线性问题.....林浒 蔡光起 于东等 (160)
- 基于离散型扰动观测器的直线电动机控制研究.....孙立宁 崔晶 曲东升等 (164)
- 椭圆加工作业中的四圆弧切比雪夫逼近.....彭云柯 (168)
- 两机械臂协调操作的容错运动规划.....赵京 荆红梅 张雷 (172)
- 基于力外环的模糊灰色预测力控制器.....张广立 付莹 杨汝清 (177)
- 松拉金成组叶片动应力分析.....柴山 余恩荪 孙义冈等 (182)
- 非独立悬架汽车转向轮自激型摆振的分岔特性分析.....林逸 李胜 (187)
- Rushton 桨搅拌槽内平均流场的二维 PIV 试验研究.....高殿荣 王益群 Acharya Sumanta (192)